

Dispersión de Contaminantes Atmosféricos: Modelado de Pluma Gaussiana y su Aplicación en la Evaluación de la Calidad del Aire

Dispersion of Atmospheric Pollutants: Gaussian Plume Modeling and its Application in Air Quality Assessment

Willian Blas Roeder¹ ; Haniel Solis Muñoz² 

RESUMEN

En este artículo se aborda el modelado de la dispersión de contaminantes atmosféricos mediante el uso de la pluma gaussiana, una técnica ampliamente utilizada en la evaluación de la calidad del aire. Se explican los fundamentos del modelado de pluma gaussiana y su aplicabilidad en la predicción de la dispersión de contaminantes emitidos por fuentes industriales y urbanas. Además, se analizan casos de estudio que ilustran la aplicación de esta técnica en la evaluación del impacto ambiental de emisiones contaminantes y la toma de decisiones para el control de la contaminación atmosférica.

Palabras clave: dispersión de contaminantes, pluma gaussiana, calidad del aire, impacto ambiental, control de la contaminación.

ABSTRACT

This article addresses the modeling of atmospheric pollutant dispersion using the Gaussian plume, a widely used technique in air quality assessment. The fundamentals of Gaussian plume modeling and its applicability in predicting the dispersion of pollutants emitted by industrial and urban sources are explained. In addition, case studies are analyzed to illustrate the application of this technique in assessing the environmental impact of pollutant emissions and making decisions for air pollution control.

Keywords: pollutant dispersion, Gaussian plume, air quality, environmental impact, pollution control.

1. INTRODUCCIÓN

La dispersión de contaminantes atmosféricos es un tema relevante en la evaluación de la calidad del aire y en la protección del medio ambiente. La técnica de pluma gaussiana ha demostrado ser una herramienta efectiva para modelar la dispersión de contaminantes en la atmósfera, proporcionando información valiosa para la toma de decisiones en la gestión y control de la contaminación atmosférica. En este artículo, se presentan los fundamentos del modelado de pluma gaussiana y su aplicabilidad en la evaluación del impacto ambiental de fuentes de emisiones contaminantes.

Los contaminantes emitidos a la atmósfera son transportados en la dirección del viento y son dispersados por los movimientos de aire, así como la turbulencia. La predicción de la concentración del contaminante en una zona cercana de un punto de emisión es de gran importancia.

En el presente estudio, se aborda el análisis de la dispersión de un contaminante emitido por una chimenea en la atmósfera, utilizando un enfoque basado en la simulación con el lenguaje de programación MATLAB. Para llevar a cabo esta investigación, se recopilieron meticulosamente los parámetros esenciales relacionados con la chimenea y las condiciones atmosféricas que afectan la dispersión del contaminante.

¹ Universidad Nacional de Trujillo, Ciudad Trujillo, País Perú. wblasro@unitru.edu.pe

² Universidad Nacional de Trujillo, Ciudad Trujillo, País Perú. hsolism@unitru.edu.pe

1.1. Modelo de pluma gaussiana

El Modelo de Pluma Gaussiana es una herramienta fundamental en la investigación y evaluación de la dispersión de contaminantes en el entorno ambiental. Basado en la fórmula de Sutton, este enfoque proporciona una comprensión esencial de cómo se distribuyen los contaminantes en áreas específicas. Es un componente clave en la investigación ambiental y en la evaluación de la calidad del aire. En esta sección, exploraremos en detalle los fundamentos de este modelo, su aplicabilidad en diferentes contextos ambientales y su relevancia en la evaluación de la contaminación.

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u_H} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (1)$$

donde:

- C concentración de contaminante en el punto (x,y,z).
- Q caudal de emisión del contaminante.
- σ_y σ_z Son las desviaciones estándar en las direcciones "y" y "z" respectivamente.
- u_H Velocidad del viento a la altura efectiva.
- H altura efectiva de la chimenea.

1.1.1. Dinámica De La Atmósfera

La atmósfera, como parte esencial del sistema terrestre, exhibe una dinámica intrincada en su comportamiento. Se pueden distinguir dos tipos fundamentales de movimientos en la atmósfera: los horizontales y los verticales. Estos movimientos atmosféricos influyen en la dispersión de contaminantes, siendo de especial importancia en la aplicación del Modelo de Pluma Gaussiana para la evaluación de la contaminación ambiental.

a. Movimientos horizontales

El movimiento horizontal del aire, también conocido como viento, es una consecuencia de diversos efectos atmosféricos, como la diferencia de temperaturas, variaciones de presión y la rotación de la Tierra. Estos factores interactúan y dan lugar a distintos patrones de circulación a diferentes escalas:

En una escala global, se establece la circulación atmosférica en tres celdas, conocidas como celdas de Hadley, Ferrel y Polar. Estas celdas abarcan vastas regiones y tienen un impacto significativo en los patrones climáticos a nivel mundial.

En una escala sinóptica, se producen movimientos atmosféricos con dimensiones de miles de kilómetros. Estos fenómenos incluyen sistemas de alta y baja presión, frentes atmosféricos y ciclones tropicales, que pueden afectar grandes áreas geográficas.

En una escala regional, los movimientos atmosféricos tienen dimensiones de cientos de kilómetros. Estos patrones regionales pueden influir en el clima y las condiciones meteorológicas en una determinada área geográfica.

A una escala más local, los movimientos atmosféricos tienen dimensiones de varias decenas de kilómetros. Estos movimientos pueden ser influenciados por características topográficas y factores locales, lo que da lugar a fenómenos como brisas marinas y brisas terrestres.

El viento, como componente horizontal del movimiento atmosférico, desempeña un papel crucial en el transporte de contaminantes emitidos en la atmósfera. La dirección y velocidad del viento determinan hacia dónde se desplazarán los contaminantes liberados en el aire. Esto es de vital importancia para comprender cómo se propagan los contaminantes y cómo pueden afectar diferentes áreas y poblaciones.

b. Movimientos verticales

Los movimientos verticales, por otro lado, están relacionados con la estabilidad del aire en la baja atmósfera. Para evaluar la estabilidad de la atmósfera, se compara el gradiente adiabático con la variación de la temperatura ambiental con la altitud.

El gradiente adiabático se refiere a la variación de la temperatura con la altura de una masa de aire que se mueve verticalmente en la atmósfera sin intercambiar calor con su entorno. Cuando una masa de aire asciende, se expande y se enfría, lo que da lugar a un gradiente adiabático negativo. Por otro lado, si el aire desciende, se comprime y se calienta, lo que resulta en un gradiente adiabático positivo.

En el contexto de aire seco, el gradiente adiabático seco es el término utilizado para referirse a esta variación de temperatura con la altitud. Esto implica que el aire en movimiento vertical no está saturado de vapor de agua, lo que simplifica el cálculo del gradiente térmico.

El conocimiento y comprensión de los movimientos verticales y la estabilidad atmosférica son fundamentales en los estudios de dispersión atmosférica. Estos movimientos afectan cómo los contaminantes liberados en la atmósfera se dispersan y se transportan verticalmente. La estabilidad atmosférica determina si los contaminantes se dispersarán horizontalmente en capas o si ascenderán verticalmente, lo que puede tener consecuencias significativas para la calidad del aire y la exposición de la población a sustancias contaminantes.

1.1.2. Variación de la velocidad del viento con la altura

En el estudio de la dispersión de contaminantes, es común contar con datos medidos mediante anemómetros ubicados a una altura de referencia de 10 metros sobre la superficie terrestre. No obstante, para alturas que abarcan desde decenas hasta cientos de metros, la variación de la velocidad del viento con respecto a la altura es un factor crucial. Esta variación, conocida como gradiente vertical del viento, influye de manera significativa en la dispersión y transporte de contaminantes a diferentes alturas en la atmósfera. Por tanto, resulta fundamental comprender cómo se modifica la velocidad del viento a medida que se asciende desde la superficie, ya que esta información es esencial para evaluar la distribución espacial de contaminantes a distintas alturas.

$$\left(\frac{u_H}{u_a}\right) = \left(\frac{H}{z_a}\right)^p \quad (2)$$

donde:

- u_H = velocidad del viento a la altura efectiva
- u_a = velocidad del viento a la altura medida
- H = altura efectiva de la chimenea
- z_a = altura del anemómetro
- p = parámetro adimensional que depende de las características del terreno y la estabilidad atmosférica

Tabla 1. Valores de p recomendados por la EPA para terrenos rugosos en la proximidad del anemómetro

ESTABILIDAD	DESCRIPCIÓN	EXPONENT P
A	Muy inestable	0.15
B	Moderadamente inestable	0.15
C	Ligeramente inestable	0.20
D	Neutra	0.25
E	Ligeramente estable	0.40
F	Estable	0.60

Nota: (Gifford, 1961). * Para terrenos con superficie lisa se deben multiplicar por 0,6 (ej. agua)

1.1.3. Coeficientes de dispersión, σ_y y σ_z

Las desviaciones estándar vertical y horizontal, representadas por σ_y y σ_z respectivamente, juegan un papel crucial en la determinación de la forma de la curva de Gauss que describe la dispersión de contaminantes en la atmósfera (Gifford, 1961). Estas desviaciones estándar son parámetros clave que caracterizan la distribución espacial del contaminante liberado en el aire.

A medida que nos alejamos del punto de emisión, los picos de la curva de Gauss disminuyen en magnitud y la anchura de la curva aumenta. Esto significa que la concentración de contaminantes se va diluyendo a medida que se aleja del foco emisor, lo que resulta en una distribución más amplia y suave de la dispersión. Los picos más bajos y la mayor anchura de la curva están asociados con mayores coeficientes de dispersión, lo que indica una dispersión más amplia del contaminante en el aire.

La magnitud de las desviaciones estándar σ_y y σ_z está directamente influenciada por la estabilidad atmosférica. La estabilidad atmosférica se refiere a la capacidad del aire para resistir el movimiento vertical y, por lo tanto,

afecta la dispersión y dilución de los contaminantes liberados en la atmósfera. En condiciones de estabilidad atmosférica, las desviaciones estándar tienden a ser mayores, lo que indica una mayor dispersión y dilución de los contaminantes en el aire. Por otro lado, en condiciones de inestabilidad atmosférica, las desviaciones estándar son menores, lo que sugiere una menor dispersión y una mayor concentración de los contaminantes en la cercanía del punto de emisión.

Es importante destacar que las desviaciones estándar σ_y y σ_z no son constantes y pueden variar en función de las condiciones atmosféricas y las características del terreno. Existen ecuaciones específicas que permiten calcular estos valores en función de la estabilidad atmosférica y otros parámetros relevantes.

$$\sigma_y = a x^{0,894} \quad (3)$$

$$\sigma_z = c x^d + f \quad (4)$$

Tabla 2. Valores de las constantes a, c, d

ESTABILIDAD	a	x≤1 km			x≥1 km		
		C	d	f	c	d	F
A	213	440.8	1.941	9.27	459.7	2.094	-9.6
B	156	106.6	1.149	3.3	108.2	1.098	2.0
C	104	61.0	0.911	0	61.0	0.911	0
D	68	33.2	0.725	-1.7	44.5	0.516	-13.0
E	50.5	22.8	0.678	-1.3	55.4	0.305	-34.0
F	34	14.35	0.740	-0.35	62.6	0.180	-48.6

Nota: (Gifford, 1961)

1.1.4. Sobre elevación del penacho

La sobre elevación del penacho, un fenómeno de gran relevancia en la dispersión de contaminantes, se encuentra influenciada por varios factores clave. Entre estos factores se incluyen la velocidad de los gases de salida, las diferencias de temperatura y la estabilidad atmosférica. El impacto de estos elementos en la sobre elevación del penacho es esencial para comprender los patrones de dispersión de contaminantes en la atmósfera, y su cuantificación se basa en las fórmulas propuestas por Briggs (Kiely, 1999). En esta sección, se explorarán en detalle estas fórmulas y su papel en la evaluación de la dispersión de contaminantes en diferentes condiciones atmosféricas.

• **Atmósfera estable (E, F):**

$$\Delta h = 2,6 \left(\frac{F}{u_H S} \right)^{1/3} \quad (5)$$

$$F = gr^2 v_s \left(1 - \frac{T_a}{T_s} \right) \quad (6)$$

$$S = \frac{g}{T_a} \left(\frac{\Delta T_a}{\Delta z} + 0,01^\circ C/m \right) \quad (7)$$

donde:

- Δh = sobre elevación del penacho
- g = aceleración de la gravedad
- r = radio interior de la chimenea
- u_H = velocidad del viento a la altura de la chimenea
- v_s = velocidad del gas de salida
- T_s = temperatura del gas de salida (K)
- T_a = temperatura ambiente (K)
- F = flotabilidad (m^4/s^3)

- S = parámetro de estabilidad (s^{-2}) Se toma como 0.020 K/m para estabilidad E y 0.035 K/m para estabilidad F

- **Atmósfera neutra o inestable (A,B,C,D):**

$$\Delta h = \frac{1,6 F^{1/3} x_f^{2/3}}{u_H} \quad (8)$$

donde:

- $x_f = 119 F^{0.4}$ si $F \geq 55 \text{ m}^4/\text{s}^3$
- $x_f = 49 F^{5/8}$ si $F < 55 \text{ m}^4/\text{s}^3$

2. DESCRIPCIÓN DEL CASO

En el presente caso de estudio, el enfoque recae en una chimenea específica que emite un flujo de 3 gramos por segundo (g/s) de un contaminante determinado. Esta chimenea posee una altura efectiva de 15 metros y expulsa el contaminante con una velocidad de 15 metros por segundo (m/s). El diámetro de la chimenea se ha establecido en 2 metros, y la temperatura de los gases emitidos alcanza los 200°C, equivalente a 473.1 Kelvin (K).

Además, se ha registrado con precisión la posición geoespacial de la chimenea en los ejes X e Y, ubicándola en la coordenada (0, 500) dentro del plano cartesiano. Estos datos espaciales resultan cruciales para la determinación de la ubicación exacta de la liberación del contaminante y el posterior análisis de su dispersión en la atmósfera.

En lo que respecta a las condiciones atmosféricas, se ha tomado en cuenta la velocidad del viento a una altura de 10 metros, la cual se ha establecido en 5 m/s. Asimismo, se ha registrado la temperatura ambiente, la cual asciende a 20°C, equivalente a 293.1 K. Estos factores meteorológicos ejercen una influencia considerable en el proceso de dispersión del contaminante y, por lo tanto, se han incorporado al análisis para una evaluación precisa.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de este estudio, se empleó la metodología de simulación mediante el lenguaje de programación MATLAB. A partir de los parámetros recopilados, se procedió a implementar el código que permitirá simular la dispersión de la pluma gaussiana del contaminante en la atmósfera.

El primer paso consistió en calcular los coeficientes de dispersión, los cuales están influenciados por la estabilidad atmosférica y las características del terreno. Se consideraron seis escenarios de estabilidad atmosférica (A, B, C, D, E, F), cada uno con sus respectivos valores de coeficientes, dependiendo de la distancia en el eje X con respecto a la chimenea.

Posteriormente, se determinó la sobreelevación del penacho de contaminante utilizando las fórmulas de Briggs, teniendo en cuenta la estabilidad atmosférica. Esta información resulta crucial para comprender cómo la estabilidad afecta la dispersión del contaminante en la atmósfera y su comportamiento en diferentes situaciones.

Finalmente, se procedió a realizar la simulación de la dispersión de la pluma gaussiana en función de la distancia en el eje X y la altura en el eje Y. A través de gráficas 3D y mapas de colores, se visualizó y analizó detalladamente la propagación del contaminante en el entorno atmosférico.

3.1. Código MATLAB

```
%-----Parametros de Chimenea-----
Q=3; % Cantidad de emisiones(g/s)
H=15; %altura efectiva chimenea (m)
vs=15; %Velocidad de salida del contaminante (m/s)
D=2; %Diametro de chimenea (m)
Tgas=200; %temperatura del gas (°C)
Ts=Tgas+273.1; %temperatura del gas (K)
xstack = 0; ystack = 500; % Posición chimenea
```

```
%-----Condiciones atmosfericas-----
uu=5; % Velocidad del viento en hu (m/s)
Tair=20; %temperatura del ambiente (°C)
Ta=Tair+273.1; %temperatura del ambiente (K)
hu=10; % altura de medicion de velocidad del viento
%-----Otros-----
x=1200; % Distancia eje X del receptor
xmin = 10; xmax = x; % intervalo eje-x
ymin = 0; ymax = 1000; % intervalo eje-y
%y=10; % Distancia desde eje Y
z=0; % Altura desde nivel suelo
%-----COEFICIENTES DE DISPERCION-----
x1= linspace(xmin,xmax,100);
xx = x1 - xstack;
xr=xx./1000;
p=zeros(size(xr));
a=zeros(size(xr));
c=zeros(size(xr));
d=zeros(size(xr));
f=zeros(size(xr));
estabil=input('Elige estabilidad [A (1), B (2), C (3), D (4), E (5), F (6)]: ');
for i=1:100
if xr(i)<=1
if estabil==1 %ESTABILIDAD A
p(i)=0.15;a(i)=213; c(i)=440.8; d(i)=1.941; f(i)=9.27;
elseif estabil==2 %ESTABILIDAD B
p(i)=0.15;a(i)=156; c(i)=106.6; d(i)=1.149; f(i)=3.3;
elseif estabil==3 %ESTABILIDAD C
p(i)=0.20;a(i)=104; c(i)=61.0; d(i)=0.911; f(i)=0;
elseif estabil==4 %ESTABILIDAD D
p(i)=0.25;a(i)=68; c(i)=33.2; d(i)=0.725; f(i)=-1.7;
elseif estabil==5 %ESTABILIDAD E
p(i)=0.40;a(i)=50.5; c(i)=22.8; d(i)=0.678; f(i)=-1.3;
elseif estabil==6 %ESTABILIDAD F
p(i)=0.6;a(i)=34; c(i)=14.35; d(i)=0.740; f(i)=-0.35;
end
else
if estabil==1 %ESTABILIDAD A
p(i)=0.15;a(i)=213; c(i)=459.7; d(i)=2.094; f(i)=-9.6;
elseif estabil==2 %ESTABILIDAD B
p(i)=0.15;a(i)=156; c(i)=108.2; d(i)=1.098; f(i)=2.0;
elseif estabil==3 %ESTABILIDAD C
p(i)=0.20;a(i)=104; c(i)=61.0; d(i)=0.911; f(i)=0;
elseif estabil==4 %ESTABILIDAD D
p(i)=0.25;a(i)=68; c(i)=44.5; d(i)=0.516; f(i)=-13.0;
elseif estabil==5 %ESTABILIDAD E
p(i)=0.40;a(i)=50.5; c(i)=55.4; d(i)=0.305; f(i)=-34.0;
elseif estabil==6 %ESTABILIDAD F
p(i)=0.6;a(i)=34; c(i)=62.6; d(i)=0.180; f(i)=-48.6;
end
end
end
lisa=input('La superficie es lisa: Sí(1) No(0)');
if lisa==1
p=p.*0.6;
end
%-----VELOCIDAD DEL VIENTO A LA ALTURA hu-----
U1=ones(size(xr))*uu;
u=U1.*(H/hu).^p; %Velocidad a la altura
%-----SOBREELEVACIÓN PENACHO-----
% FORMULAS DE BRIGGS
F=9.8*((D/2)^2)*vs*(1-Ta/Ts);
if F<55
xf=49*F^(5/8);
else
xf=119*F^(2/5);
end
if estabil==5
S=9.8*0.020/Ta; %ESTABILIDAD E
DH=2.6.*(F./(u.*S)).^(1/3);%ATMOSFERA ESTABLE (E,F)
elseif estabil==6
S=9.8*0.035/Ta; %ESTABILIDAD F
DH=2.6.*(F./(u.*S)).^(1/3);%ATMOSFERA ESTABLE (E,F)
elseif estabil==1|estabil==2|estabil==3|estabil==4
DH=1.6*(F^0.333)*(xf^0.666)./u; %ATMOSFERA NEUTRA O INESTABLE (A,B,C,D)
```

```

end
H1=ones(size(xr))*H;
hef=H1 +DH; %altura efectiva de la fuente
%-----CALCULOS-----
%VALOR DE LOS COEFICIENTES SEGÚN CONSTANTES OBTENIDAS
sigmay=a.*(xx./1000).^0.894; %Desviación estandar de la distribución gaussiana
sigmaz=c.*(xx./1000).^d+f; %Desviación estandar de la distribución gaussiana

Dy =sigmay;
Dz =sigmaz;
HEF=hef;
for i=1:99
Dy =[Dy;sigmay];
Dz =[Dz;sigmaz];
HEF=[HEF;hef];
end
z=z*ones(100);
%-----CALCULOS-----
[x1,y] = meshgrid (linspace(xmin,xmax,100),linspace(ymin,ymax,100));
xx = x1 - xstack;
yy = y - ystack;

C = Q./(2*pi.*Dy.*Dz*vs).*exp(-(yy.^2)./(2.*Dy.^2)).*(exp(-1.*((z-
HEF).^2)./(2.*Dz.^2))+exp(-1.*((z+HEF).^2)./(2.*Dz.^2)));
%grafica 3d
surf(x1,y,C);
figure;
colormap default
pcolor(x1,y,C); colorbar;
shading interp
xlabel('eje X');
ylabel('eje Y');

```

4. RESULTADOS

La implementación exitosa de la simulación en MATLAB ha proporcionado resultados significativos sobre la dispersión de la pluma gaussiana de contaminante en la atmósfera. Los hallazgos son de gran importancia para la evaluación de la calidad del aire y la toma de decisiones informadas en el ámbito ambiental.

Los coeficientes de dispersión calculados para diferentes escenarios de estabilidad atmosférica (A, B, C, D, E, F) han demostrado su influencia en la dispersión del contaminante. Se observó que en el caso de estudio presentado, donde se consideraron las condiciones de estabilidad atmosférica específicas, la pluma gaussiana se comportó de manera particular. En situaciones de mayor estabilidad atmosférica, como en este caso, la pluma gaussiana permaneció más concentrada y cercana a la fuente de emisión. En contraste, en condiciones de menor estabilidad, la dispersión del contaminante se amplió en un rango más extenso.

La sobreelevación del penacho, calculada con las fórmulas de Briggs, mostró cómo la estabilidad atmosférica impacta en la altura del penacho de contaminante con respecto a la chimenea en el escenario específico del estudio. Estos datos revelan la importancia de considerar la estabilidad en la gestión de la contaminación atmosférica en este contexto.

Las simulaciones 3D y los mapas de colores permitieron una representación gráfica de la dispersión del contaminante en función de la distancia en el eje X y la altura en el eje Y en el caso de estudio presentado. Esto facilitó una comprensión visual de cómo la pluma gaussiana se propaga en diferentes condiciones atmosféricas en este escenario específico, lo que resulta esencial para la toma de decisiones en la gestión ambiental.

Los resultados se presentan en la Figura 1, que ilustra claramente la dispersión de la pluma gaussiana en el caso de estudio particular. En resumen, estos hallazgos son fundamentales para la investigación ambiental y la formulación de políticas orientadas a preservar la calidad del aire en el contexto específico analizado.

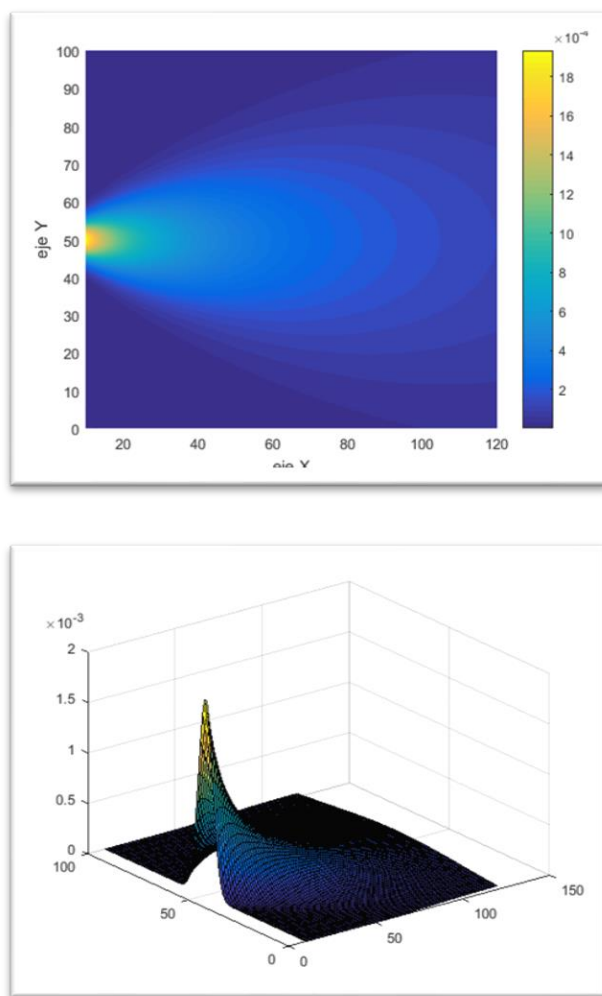


Figura 1. Valores simulados de concentración

5. CONCLUSIONES

La técnica de modelado de pluma gaussiana se ha revelado como una herramienta esencial en la evaluación y gestión de la contaminación atmosférica, desempeñando un papel fundamental en la toma de decisiones informadas para la protección del medio ambiente y la salud pública. El uso efectivo de esta técnica en la evaluación del impacto ambiental de fuentes emisoras de contaminantes proporciona información crucial para identificar áreas críticas y aplicar medidas de control de emisiones adecuadas. Este enfoque contribuye significativamente a mejorar la calidad del aire, lo que a su vez fomenta una sociedad más sostenible y saludable.

Los resultados obtenidos a través de la simulación de la dispersión de la pluma gaussiana en un caso de estudio específico demostraron que la estabilidad atmosférica desempeña un papel destacado en la dispersión del contaminante. En el escenario analizado, se observó que en situaciones de mayor estabilidad atmosférica, la pluma gaussiana se mantuvo más concentrada y cercana a la fuente de emisión. Por otro lado, en condiciones de menor estabilidad, la dispersión se amplió en un rango más extenso. Estos hallazgos enfatizan la importancia de considerar la estabilidad atmosférica en la gestión de la contaminación atmosférica.

Las simulaciones en 3D y los mapas de colores proporcionaron una representación gráfica efectiva de cómo la pluma gaussiana se propaga en función de la distancia y la altura en el caso de estudio. Esta visualización contribuye significativamente a la comprensión de la dispersión del contaminante y, por lo tanto, se convierte en una herramienta valiosa para la toma de decisiones informadas en la gestión ambiental.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Briggs, G. A., 1969:Plume Rise. U.S. Atomic Energy Commission Div. Tech. Inform., TID-25075, 81 pp.
- Briggs, C. A., 1973:Diffusion Estimation for Small Emissions. In Environ. Res. Lab., Air Resources Atmos. Turbulence and Diffusion laboratory, NOAA, Oak Ridge, Tennessee,1973 Annual Rep., ATDL-106, US-COD-NOAA.
- Kiely, G. 1999. Ingeniería Ambiental. Fundamentos, Entornos, Tecnologías y Sistemas de Gestión.
- Pasquill, F., 1961: The estimation of dispersion of windborne material.Meteor. Mag. 90, 33–49.
- Pasquill, F., 1976:Atmospheric Dispersion Parameters in Gaussian Plume Modelling — Part II: Possible Requirements for Change in the Turner Workbook values. EPA 600/4-76-030B, U.S. Environmental Protection Agency, Res. Triangle Park, NC, 44 pp.
- Toolbox, S. M. (1993). Matlab. Mathworks Inc, 20.